多源含铜固体废物协同熔炼的渣相调控机制研究①

郑环东[1]，丁银贵[1]，陈士朝[1]，游韶玮[1]，韩志彪[1]，张深根[2]，韩凤兰[3]

（1.中节能工程技术研究院有限公司，北京 100082；2.南昌大学 物理与材料学院，江西 南昌 330031；3.北方民族大学 材料科学与工程学院，宁夏 银川 750021）

摘　要：针对废线路板等高价值含铜固体废物传统火法回收中物料能耗高、回收效率低的技术瓶颈，开展了多源含铜固体废物协同熔炼过程的渣相调控机制研究。基于 $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3\text{-}FeO$ 四元相图，确定当 $m(FeO)/m(SiO_2)=1/9\sim1/1$，$w(CaO)=10\%\sim40\%$ 时，熔渣初晶相区主要分布于单斜辉石、硅灰石及尖晶石区域，其理论熔点低于 1 300 ℃。炉渣物化性质预测模型表明，$m(FeO)/m(SiO_2)$ 由 0.5 提升至 1.0，可显著改善熔体流动性，其中 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 为 1.0 时流动性最优，符合工业化熔炼要求。优化的实验条件为：$m(FeO)/m(SiO_2)=0.8$、$m(CaO)/m(SiO_2)=0.4$、1 350 ℃恒温熔炼 1 h，此条件下炉渣残余铜含量降至 0.18%，铜回收率高达 99.39%。所得粗铜合金主要包含 Cu、C、S、Pb、Fe 和 Sn 等元素。增大 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 虽有助于提高金属回收率，但会增加后续电解精炼的分离难度。

关键词：含铜固体废物；废线路板；含铜污泥；铜烟灰；火法熔炼；粗铜合金；渣型；渣相

中图分类号：TF811　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.021

文章编号：0253-6099(2026)02-0133-07

Slag Phase Regulation Mechanism in Cooperative Smelting of Multi-source Copper-Bearing Solid Waste

ZHENG Huandong[1], DING Yingui[1], CHEN Shichao[1], YOU Shaowei[1],
HAN Zhibiao[1], ZHANG Shengen[2], HAN Fenglan[3]

(1. *CECEP Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing* 100082, *China*; 2. *School of Physics and Materials*, *Nanchang University*, *Nanchang* 330031, *Jiangxi*, *China*; 3. *School of Material Science and Engineering*, *North Minzu University*, *Yinchuan* 750021, *Ningxia*, *China*)

Abstract: To address the technical bottlenecks of both high consumption of materials and energy and low recovery efficiency in traditional pyrometallurgical recycling of high-value copper-bearing solid wastes such as waste printed circuit boards, the slag phase regulation mechanism in cooperative smelting of multi-source copper-bearing solid waste was investigated. An analysis of the quaternary phase diagram of $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3\text{-}FeO$ system reveals that when the mass ratio of FeO to SiO_2 ranges from 1/9 to 1/1 and mass fraction of CaO is within the range of 10%−40%, the primary crystal phase regions of molten slag are primarily distributed in the areas of clinopyroxene, wollastonite and spinel, and a theoretical melting point is lower than 1 300 ℃. A prediction model for physicochemical properties of slag demonstrates that the fluidity of the molten slag can be significantly improved by increasing FeO/SiO_2 ratio from 0.5 to 1.0, and the optimal fluidity is achieved with FeO and SiO_2 at a mass ratio of 1.0, which can meet the requirements of industrial smelting. An experiment was performed with the optimized conditions, including FeO and SiO_2 at a mass ratio of 0.8, CaO and SiO_2 at a mass ratio of 0.4, smelting at a constant-temperature of 1 350 ℃ for 1 h, resulting in the obtained slag with the residual copper content therein reduced to 0.18% and copper recovery up to 99.39%. The produced crude copper alloy mainly contained Cu, C, S, Pb, Fe, Sn and other elements. It is concluded that increasing the FeO/SiO_2 ratio can contribute to improving metal recovery, but it can also increase separation difficulty in the subsequent

① **收稿日期**：2025-10-08
基金项目：国家重点研发计划(2022YFC390150203)
作者简介：郑环东(1994—)，男，湖南岳阳人，博士，工程师，主要研究方向为固体废物处置与高值化利用。E-mail：zhenghuandongUSTB@163.com
通信作者：丁银贵(1981—)，男，河北石家庄人，高级工程师，主要研究方向为多源金属固体废物回收。E-mail：dyg6800@163.com

electrolytic refining process.

Key words: copper-containing solid waste; waste printed circuit boards; copper-bearing sludge; copper flue dust; pyrometallurgical smelting; crude copper alloy; slag type; slag phase

我国铜消费量巨大,但矿产资源匮乏,对外依存度超过70%,资源保障形势严峻[1]。废线路板、含铜污泥和铜冶炼烟灰等是含铜固体废物,也是宝贵的含铜二次资源,加强这类资源的回收对保障铜供应安全和降低环境污染至关重要[2-3]。

火法冶金是处置含铜固体废物的重要途径,其核心在于通过熔炼实现铜及稀贵金属在合金相中的定向富集[4-5]。已有研究表明,在高温熔炼过程中,金属或锍相通常以微米级颗粒形式弥散分布于熔渣基体中,其迁移行为主要受布朗运动和热迁移效应支配。为了提高金属分离回收率,必须调控渣型,使其满足低熔点、低黏度的要求,从而有利于金属或锍相的迁移和聚集[6-8]。含铜固体废物中主要成渣元素为Al和Si,其氧化物熔融状态下聚合成复杂的链状或网状结构。熔体硅氧网络聚合程度的提升引发流变性能衰减,其黏滞系数随三维网状结构致密化而显著增大,甚至导致形成"泡沫渣"[9-10]。通过优选助熔剂如CaO和FeO,与铝、硅等反应生成低温共熔体,同时降低玻璃网络聚合度,提高熔体流动性,可以为低温熔炼回收提供基本条件[11]。因此,本文针对多源含铜固体废物协同火法熔炼的渣相调控问题,系统研究渣系组成对熔渣性质及有价金属在渣-金属相间分配行为的影响规律,以期在低能耗条件下实现多金属的高效协同回收,为工业化应用提供理论依据与技术支撑。

1 实验部分

1.1 原料

以废线路板、含铜污泥和铜冶炼烟灰为原料。废线路板由中节能(汕头)再生资源技术有限公司提供;含铜污泥与铜冶炼烟灰均取自大冶有色金属集团控股有限公司。典型含铜固体废物的XRD图谱和主要元素组成分别见图1和表1。由图1和表1可知,废线路板含有金属单质(Cu、Sn、Pb)与SiO_2等物相,同时含有少量Ca(2.0%)、Fe(4.0%)等元素,其物相组成符合典型电子废弃物特征;含铜污泥中Ca元素以石膏相($CaSO_4 \cdot nH_2O$)形式赋存,同时检测到Fe_2O_3等金属氧化物;铜冶炼烟灰呈现显著重金属富集特性,含Cu(16.3%)、Zn(33.3%)、Pb(10.1%)及As(19.5%)等组分,XRD图谱显示其主要物相为Zn及Cu的盐类化合物。

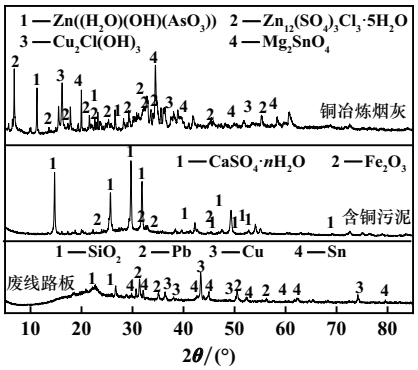


图1 典型含铜固体废物XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of typical copper-containing solid wastes

表1 典型含铜固体废物主要元素组成(质量分数)

Table 1 Elemental composition of typical copper-containing solid wastes %

种类	Ca	Si	Fe	Cu	Sn	Pb	Al	S	As	Bi	Zn
废线路板	2.0	13.1	4.0	18.0	2.1	1.3	4.5	—	—	—	—
含铜污泥	15.2	0.4	1.8	20.4	—	—	0.4	8.8	—	—	—
铜冶炼烟灰	—	1.3	0.9	16.3	2.8	10.1	—	13.6	19.5	12.9	33.3

1.2 实验流程

先对原料进行预处理。预处理环节包括废线路板的切割与粉碎。实验在马弗炉中进行,实验分为3步:① 将废线路板、含铜污泥、铜冶炼烟灰按质量比58∶15∶15混合,并配入一定量助熔剂如CaO和FeO,然后放入刚玉坩埚中;② 将坩埚置于马弗炉中,升温至实验温度并保温1 h,马弗炉升温速率控制在10 ℃/min;③ 熔炼结束后,坩埚随炉冷却至室温。熔炼后样品分为上层和下层,上层是炉渣,下层是粗铜合金。所得粗铜合金和炉渣分别制样,然后取样进行成分检测。

1.3 测试与计算

采用X射线荧光光谱分析仪(XRF-1800, Shimadzu)测定样品化学成分;采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, iCAP Pro)测定样品铜、铁、铅、锡含量;采用X射线衍射仪(XRD D8 Advance)测定样品物相;采用扫描电子显微镜-能谱仪(SEM-EDS, ZEISS Sigma 360 & Quantax 400)测定样品形貌及元素分布。铜回收率计算公式为:

$$R = \frac{m_2 \times c_2}{m_1 \times c_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:R为铜回收率,%;m_1、m_2分别为原料和粗铜合

金的质量，g；c_1、c_2 分别为原料和粗铜合金中金属的含量，g/t。

元素分配比计算公式为：

$$L_{Fe}=\frac{w(Fe)_s}{w(Fe)_a} \tag{2}$$

式中：L_{Fe}为元素 Fe 的分配比；$w(Fe)_s$和 $w(Fe)_a$分别为炉渣和粗铜合金中元素 Fe 的质量分数，%。

炉渣密度计算采用叠加模型：

$$x_i=\frac{\frac{m_i}{M_i}}{\sum\frac{m_i}{M_i}} \tag{3}$$

$$M=\sum x_iM_i \tag{4}$$

$$V=\sum x_iV_i \tag{5}$$

式中：x_i为组分 i 物质的量分数，无量纲；m_i为组分 i 的质量，g；M_i为组分 i 的摩尔质量，g/mol；M 为炉渣的摩尔质量，g/mol；V 为炉渣的摩尔体积，cm^3/mol；V_i为组分 i 的偏摩尔体积，cm^3/mol。

各氧化物的偏摩尔体积见表 2。

表 2　各氧化物的偏摩尔体积

Table 2　Partial molar volumes of each oxide

氧化物种类	偏摩尔体积/($cm^3\cdot mol^{-1}$)	文献来源
CaO	$20.7[1+10^{-4}(T-1\,773)]$	[12]
SiO_2	$27.516[1+10^{-4}(T-1\,773)]$	[12]
Al_2O_3	$28.3[1+10^{-4}(T-1\,773)]$	[13]
FeO	$15.8[1+10^{-4}(T-1\,773)]$	[14]
MgO	$16.1[1+10^{-4}(T-1\,773)]$	[15]

2　结果与讨论

2.1　渣型设计

为提高金属回收率并减少炉渣金属损失，要求炉渣具备低黏度、低密度及良好流动性等特性[16]。采用 FactSage 软件绘制了含铜固体废物体系下 CaO-SiO_2-Al_2O_3三元和 CaO-SiO_2-FeO-Al_2O_3四元液相面投影图，如图 2 所示。沿原料中 SiO_2与 Al_2O_3质量比构成的基准线观察各初晶相演变规律：CaO（氧化物）→ $2CaO\cdot SiO_2$（C_2S）→ $CaO\cdot SiO_2$（CS）→ $CaAl_2Si_2O_8$（CA_2S_2）→ $3Al_2O_3\cdot 2SiO_2$（莫来石，A_3S_2）。随着 CaO 含量增加，液相线温度呈先降后升趋势。体系在 $CaAl_2Si_2O_8$（CA_2S_2）-CS-SiO_2三元共晶区域达到最低熔点，对应 CaO 适宜添加量为 10%～40%，当 CaO 添加量超出该范围时，莫来石相的形成将显著提升炉渣熔点。该体系低温液相区具有明显的成分敏感性，成分偏差超过±2%，引发熔点陡升现象。通过引入 FeO 作为助熔介质重构相图，可以进一步拓宽低黏度工作窗口。引入 FeO 后，1 300 ℃液相区范围增大，且局部区域熔点低于 1 200 ℃。较佳的成分区间对应为：FeO 与 SiO_2质量比 $m(FeO)/m(SiO_2)$ = 1/9 ～ 1/1，$w(CaO)$= 10%～40%，对应初晶区为单斜辉石、硅灰石及尖晶石，渣相熔点低于 1 300 ℃。

不同温度下 $m(FeO)/m(SiO_2)$对炉渣黏度的影响见图 3。由图 3 可知，随着温度升高，炉渣黏度显著降低，这是因为升高温度会破坏炉渣中硅氧四面体网络结构，降低炉渣聚合度，从而减小流动阻力，使黏度下降。温度相同时，炉渣黏度随$m(FeO)/m(SiO_2)$增加

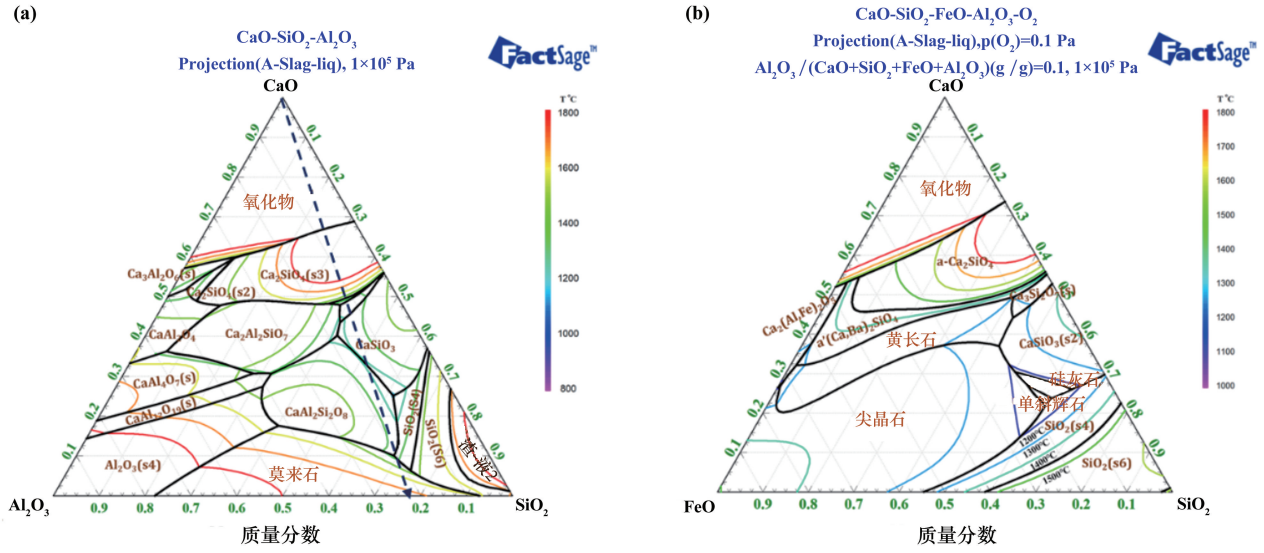


图 2　含铜固体废物体系下的多元液相面投影图

Fig. 2　Liquidus surface projection of copper-bearing solid waste systems

明显降低。$m(FeO)/m(SiO_2)=1$ 时，1 250 ℃下炉渣黏度达到 0.68 Pa·s。适宜熔炼温度为 1 250 ℃，此温度下炉渣流动性较好，有利于熔炼过程的进行。

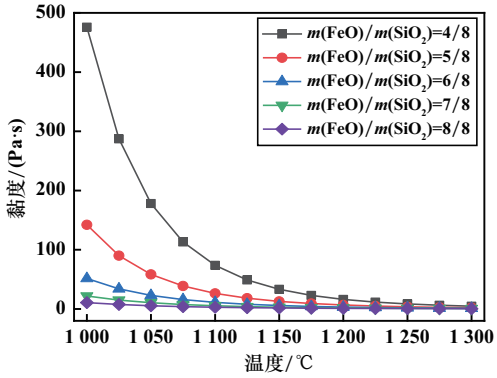


图 3 不同温度下 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 对炉渣黏度的影响

Fig. 3 Effects of FeO/SiO_2 ratio on slag viscosity at different temperatures

1 250 ℃下，$m(FeO)/m(SiO_2)$ 对炉渣密度的影响见图 4。由图 4 可知，炉渣密度随 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 增大而缓慢增大，炉渣和金属相密度差减小。根据斯托克斯定律，减小炉渣黏度或者提高金属相与炉渣的密度差会增大金属在熔融炉渣中的沉降速度，从而缩短沉降时间。总体而言，增大 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 有利于降低炉渣黏度，促进金属的聚集长大，但同时也会缩小炉渣和金属相的密度差异，对金属的沉降速度产生不良影响。

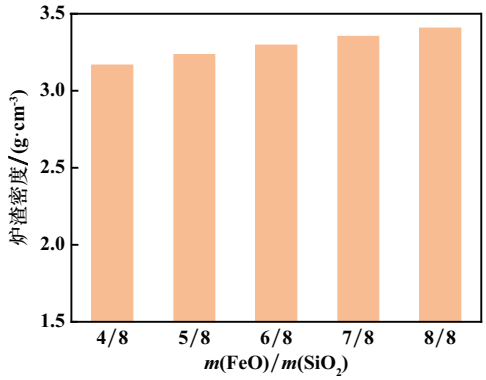


图 4 1 250 ℃ 下 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 对炉渣密度的影响

Fig. 4 Effect of FeO/SiO_2 ratio on slag density at 1 250 ℃

2.2 协同冶炼工艺优化

2.2.1 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 对铜回收的影响

$m(FeO)/m(SiO_2)$ 对铜回收的影响见图 5。由图 5 可知，炉渣铜含量随 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 增大而降低，铜含量在 $m(FeO)/m(SiO_2)=0.2\sim1.1$ 时显著降低。$m(FeO)/m(SiO_2)=1.1$ 时，炉渣铜含量达到 0.26%，且回收率达到最大值，为 99.14%。在硅铝酸盐体系中，Si 和 Al 分别形成基本结构单体 $[SiO_4]^{4-}$ 和 $[AlO_4]^{5-}$ 四面体，二者通过氧桥连接形成多级聚合结构，包括双四面体单元 $[Si_2O_7]^{6-}$、链式单元 $[Si_3O_9]^{6-}$ 及层网单元 $[Si_4O_{10}]^{4-}$，分别对应二聚体、链状及三维网络拓扑构型。FeO 与自身氧的结合能力较差，在熔体中会产生 Fe^{2+} 和游离 O^{2-}，一方面 Fe^{2+} 分散在三维网络结构中起电荷补偿的作用，另一方面游离 O^{2-} 可以破坏 Si—O 键，将铝硅酸盐结构解聚，表现为非桥氧和游离氧含量增加，从而降低熔体黏度。因此，增大 Fe/Si 比值可显著改善熔体流变特性，通过加速热质传递促进金属颗粒聚集，实现金属与炉渣的高效分离。

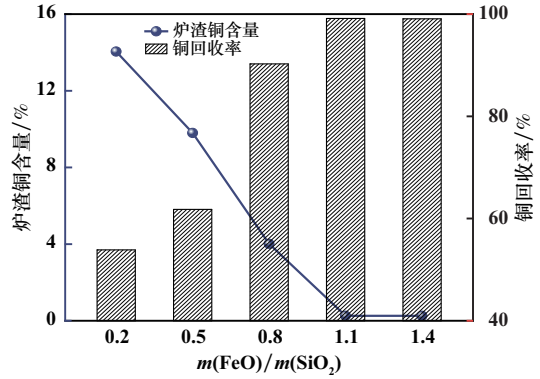


图 5 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 对铜回收的影响

Fig. 5 Effect of FeO/SiO_2 ratio on copper recovery

图 6 为不同 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 下粗铜合金的物相组成。由图 6 可知，在 FeO 添加量较小时，合金中主要为 Cu 相。随着 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 增加，合金中 Fe 与 Cu_2SnS_3 相含量增加。

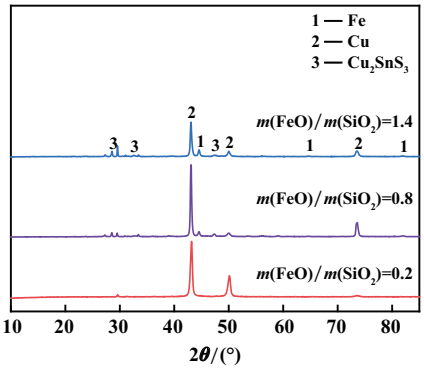


图 6 不同 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 下粗铜合金的物相组成

Fig. 6 Phase composition of crude copper alloys obtained with different FeO/SiO_2 ratios

2.2.2 $m(CaO)/m(SiO_2)$ 对铜回收的影响

固定 $m(FeO)/m(SiO_2)=0.8$，为降低成本，以 CaO 部分替代 FeO，研究了 $m(CaO)/m(SiO_2)$ 对铜回收的影响，结果见图 7。由图 7 可知，炉渣铜含量随 $m(CaO)/m(SiO_2)$ 增大呈现先降低后增加的趋势；

$m(CaO)/m(SiO_2)$为 0.4 时，炉渣铜含量低至 0.18%，铜回收率最高，达到 99.39%，这表明在一定范围内增加 $m(CaO)/m(SiO_2)$有利于铜的回收，适宜的 $m(CaO)/m(SiO_2)$为 0.4。CaO 与 FeO 作为碱性氧化物可以抑制 SiO_4^{4-}等高聚合度结构单元形成，从而降低炉渣黏度，但碱性氧化物含量过高时，自由氧离子的数量足够多，此时 SiO_4^{4-}是炉渣中主要离子团，增加自由氧离子不能增大硅氧网络体的解聚。

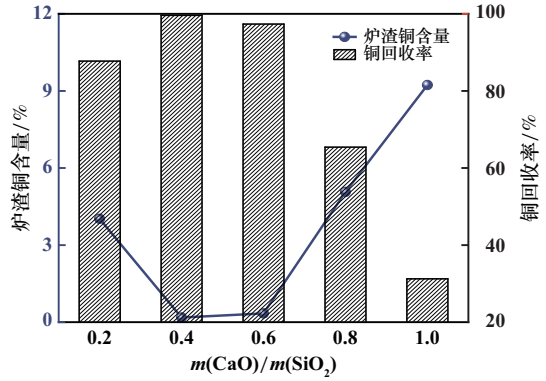
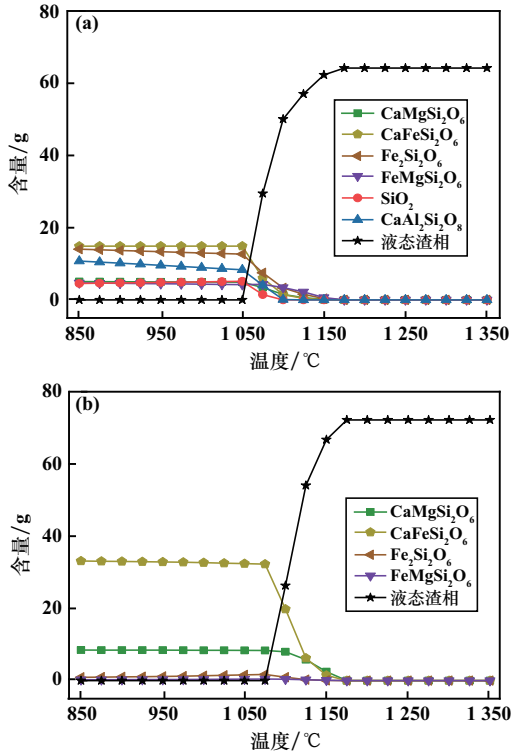


图 7　$m(CaO)/m(SiO_2)$ 对铜回收的影响

Fig. 7　Effect of CaO/SiO_2 ratio on copper recovery

图 8 为熔炼过程中物质平衡反应模拟结果。由图 8 可知，在熔炼过程中，体系中主要形成透辉石($CaMgSi_2O_6$)、钙铁辉石($CaFeSi_2O_6$)、斜铁辉石($Fe_2Si_2O_6$)和紫苏辉石($FeMgSi_2O_6$)等相。CaO 含量较高时，其更容易与其他成分形成高熔点的透辉石和钙铁辉石，导致渣系熔化温度升高，不利于金属的聚集与沉降。



(a) $m(CaO)/m(SiO_2)$= 1/4；(b) $m(CaO)/m(SiO_2)$= 1/2

图 8　熔炼过程中物质平衡反应模拟结果

Fig. 8　Simulation results of material balance and reaction during smelting

2.2.3　熔炼温度对铜回收的影响

$m(FeO)/m(SiO_2)$= 0.8、$m(CaO)/m(SiO_2)$= 0.4 条件下，探究了熔炼温度对铜回收的影响，结果见图 9。由图 9 可知，随着熔炼温度升高，铜回收率迅速提高，炉渣铜含量呈下降趋势。当熔炼温度达到 1 350 ℃时，铜回收率高达 99.39%，炉渣铜含量低至 0.18%，适宜的熔炼温度为 1 350 ℃。铜的碳热还原为吸热反应，较高的温度有利于反应的正向进行。此外，高温促进了硅酸盐网络结构的解聚，降低了炉渣的黏度，提高了炉渣的流动性。

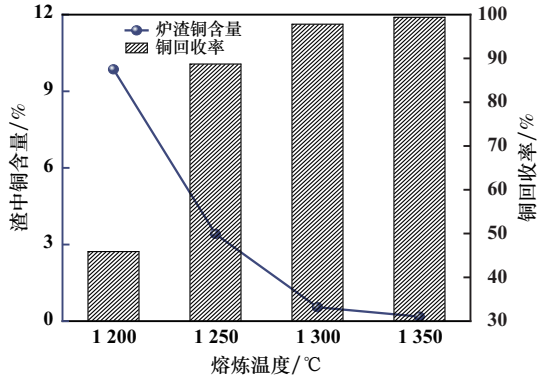


图 9　熔炼温度对铜回收的影响

Fig. 9　Effect of temperature on copper recovery

2.3　元素分布规律

不同 $m(FeO)/m(SiO_2)$下 Fe 分配比及合金中 Cu 和 Fe 占比见图 10。随着 $m(FeO)/m(SiO_2)$增加，Fe 分配比总体呈现上升趋势，这说明提高铁硅比促进了铁向渣相的迁移。增加FeO含量提高了其在渣中的

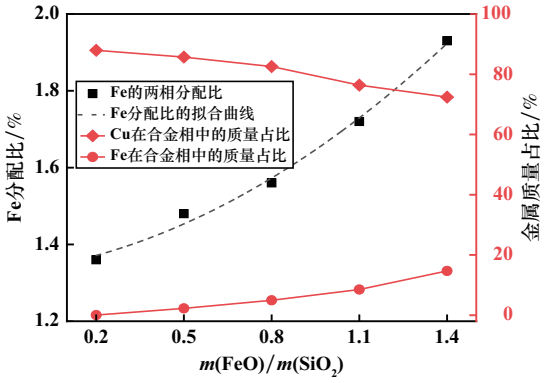
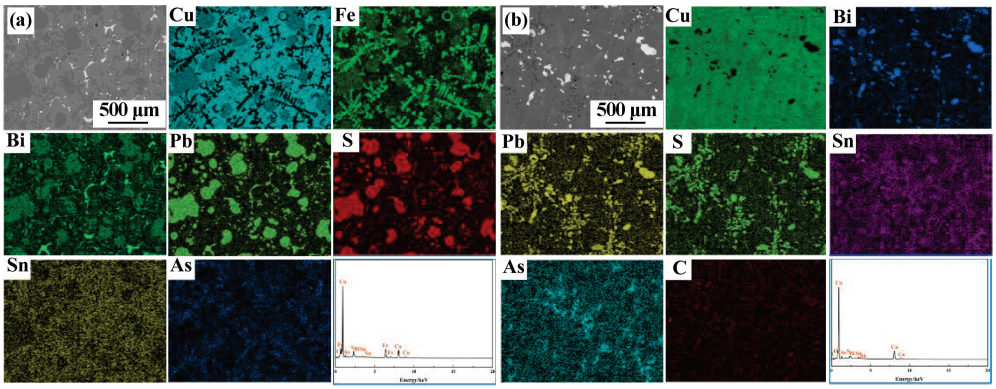


图 10　不同 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 下 Fe 分配比及合金中 Cu 和 Fe 占比

Fig. 10　Distribution ratio of Fe and proportions of Cu and Fe in alloy obtained with different FeO/SiO_2 ratios

活度,而铁分配比与其活度成正比。尽管铁分配比增大,但熔炼过程中部分 FeO 会被碳或一氧化碳还原为单质铁进入合金相,提高铁硅比意味着进入合金中的铁总量增多。化学测试结果表明合金中铜浓度逐渐降低,而铁浓度则相应升高。虽然增大铁硅比降低了炉渣黏度,有利于金属颗粒的聚集和沉降,但也导致了合金中杂质铁含量增加,这不利于后续铜的分离与提纯。

不同 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 下粗铜合金背散射及能谱图见图 11。由图 11 可知,$m(FeO)/m(SiO_2)=1.4$ 时,合金中含 Fe 物相主要以鱼骨形态富集,富 Fe 相中铜含量极低,As 主要分布在富 Fe 相中,Sn 主要镶嵌于 Cu 基底相中。根据相图分析可知,两者主要以固溶体或金属间化合物形式存在,S、Pb 和 Bi 富集成块状及白色条状相。$m(FeO)/m(SiO_2)=0.8$ 时,几乎未检测到含 Fe 物相,铜基底相区域面积占比增大,其中铜含量高达 80%以上。



(a) $m(FeO)/m(SiO_2)=1.4$; (b) $m(FeO)/m(SiO_2)=0.8$

图 11 不同 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 下粗铜合金背散射及能谱图

Fig. 11 BSE images and EDS patterns of crude copper alloy obtained with different FeO/SiO_2 ratios

3 结论

1) 基于 $CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2\text{-}FeO$ 四元渣系相图分析,当 $m(FeO)/m(SiO_2)=1/9\sim1/1$,$w(CaO)=10\%\sim40\%$ 时,炉渣初晶相区稳定分布于单斜辉石、硅灰石及尖晶石区间,其理论熔融温度较传统渣系降低 100~150 ℃,炉渣黏度、密度预测模型研究表明,增大 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 有利于改善熔体流动性及金属沉降性能。

2) 通过协同熔炼工艺参数优化实验,确定较佳操作条件为:$m(FeO)/m(SiO_2)=0.8$、$m(CaO)/m(SiO_2)=0.4$、1 350 ℃恒温熔炼 1 h。在此条件下,炉渣铜残留量降至 0.18%,铜回收率达 99.39%。

3) 粗铜合金主要包含 Cu、C、S、Pb、Fe 和 Sn 等元素。其中,铜主要以单质 Cu 及 Cu_2SnS_3 形式赋存。增大 $m(FeO)/m(SiO_2)$ 提升了金属回收率,但也促进了富铁相的形成,增大了后续电解精炼的分离难度。

参考文献(References):

[1] 黄伟军,龚先政,高峰,等. 中国铜产品环境足迹评价和供应风险综合评估[J]. 中国有色金属学报, 2023,33(5):1541-1553.
HUANG Weijun, GONG Xianzheng, GAO Feng, et al. Copper products environmental footprint assessment and comprehensive supply risk evaluation for China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023,33(5):1541-1553.

[2] 王云燕,张富,王静雯,等. 典型铜熔炼渣中铅、砷赋存特征研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(4):95-105.
WANG Yunyan, ZHANG Fu, WANG Jingwen, et al. Study on the occurrence characteristics of lead and arsenic in typical copper smelting slag[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(4):95-105.

[3] 丁银贵,黄文,陈士朝,等. 废电路板金属含量及经济价值研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(2):178-184.
DING Yingui, HUANG Wen, CHEN Shichao, et al. Research on metal content and economic value of waste printed circuit boards[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(2):178-184.

[4] 陈士朝,丁银贵,张欣,等. 基于顶吹熔池熔炼工艺协同处理含铜污泥[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(4):14-19.
CHEN Shichao, DING Yingui, ZHANG Xin, et al. Collaborative treatment of copper-containing sludge based on top blowing bath smelting process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(4):14-19.

[5] 龚傲,吴选高,喻小强,等. 碳热还原-低碳精炼处理含铜污泥分离富集有价金属[J]. 中国有色金属学报, 2020,30(9):2178-2189.
GONG Ao, WU Xuangao, YU Xiaoqiang, et al. Separation and enrichment of valuable metals from copper-containing sludge treated by carbothermal reduction-low carbon refining[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020,30(9):2178-2189.

[6] WANG Z W, GAO J T, LAN X, et al. A new method for continuous recovery of fine copper droplets from copper matte smelting slag via su-

per-gravity[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022,182:106316.

[7] JIANG C H, ZHANG H X, XIONG Z X, et al. Molecular dynamics investigations on the effect of Na_2O on the structure and properties of blast furnace slag under different basicity conditions[J]. Journal of Molecular Liquids, 2020,299:112195.

[8] BI Z S, LI K J, JIANG C H, et al. Effects of B_2O_3 on the structure and properties of blast furnace slag by molecular dynamics simulation[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2021,551:120412.

[9] YU Y, WANG H, HU J H. Co-treatment of electroplating sludge, copper slag, and spent cathode carbon for recovering and solidifying heavy metals[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021,417:126020.

[10] 林荔,何峰. 富氧侧吹熔炼-多枪顶吹吹炼工艺全流程数值模拟[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(6):103-112.
LIN Li, HE Feng. Numerical simulation of whole process of oxygen-enriched side-blown smelting and multi-lance top-blown converting[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(6):103-112.

[11] 杨必文,李强,章小兵,等. 基于共存理论的废线路板火法熔炼渣-铜平衡研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):153-160.
YANG Biwen, LI Qiang, ZHANG Xiaobing, et al. Research on slag-copper equilibrium in smelting of waste circuit board based on coexistence theory[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):153-160.

[12] 吴铖川,成国光,马琦琦. CaF_2-CaO-Al_2O_3-MgO-SiO_2 渣系表面张力计算模型[J]. 上海金属, 2014,36(3):33-36.
WU Chengchuan, CHENG Guoguang, MA Qiqi. Calculating model on the surface tension of CaF_2-CaO-Al_2O_3-MgO-SiO_2 slag system[J]. Shanghai Metals, 2014,36(3):33-36.

[13] MILLS K C, KEENE B J. Physical properties of BOS slags[J]. International Materials Reviews, 1987,32(1):1-120.

[14] 许继芳,李建朝,翁文凭,等. MgO-B_2O_3-SiO_2-CaO-Al_2O_3 体系富硼渣表面张力的计算[J]. 中国有色金属学报, 2017,27(1):206-214.
XU Jifang, LI Jianchao, WENG Wenping, et al. Calculation of surface tension for MgO-B_2O_3-SiO_2-CaO-Al_2O_3 molten boron-rich slag system[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017,27(1):206-214.

[15] 吴铖川,成国光. CaO-Al_2O_3-TiO_2熔渣表面张力计算模型[J]. 上海金属, 2014,36(2):35-39.
WU Yuechuan, CHENG Guoguang. Calculating models on the surface tension of CaO-Al_2O_3-TiO_2 molten slag[J]. Shanghai Metals, 2014,36(2):35-39.

[16] TANG H M, PENG Z W, TIAN R, et al. Recycling of platinum-group metals from spent automotive catalysts by smelting[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022,10(6):108709.

引用本文:郑环东,丁银贵,陈士朝,等. 多源含铜固体废物协同熔炼的渣相调控机制研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):133-139.
ZHENG Huandong, DING Yingui, CHEN Shichao, et al. Slag phase regulation mechanism in cooperative smelting of multi-source copper-bearing solid waste[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):133-139.

(上接第 132 页)

[4] ZHU Z Y, WANG D H, LI Y K, et al. Detail mineralogical study and geochronological framework of Bayan Obo (China) Nb mineralization recorded by in situ U-Pb dating of columbite[J]. Ore Geology Reviews, 2024,165:105874.

[5] 赵燕鲁,张波,刘承军,等. 白云鄂博铌精矿氢还原研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):112-116.
ZHAO Yanlu, ZHANG Bo, LIU Chengjun, et al. Hydrogen reduction process for Bayan Obo niobium concentrate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):112-116.

[6] REN Y S, YANG X Y, YANG X M, et al. Mineralogical study on the distribution regularity of niobium in various types of ores in the giant Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit[J]. Ore Geology Reviews, 2023,161:105602.

[7] 王汝成,车旭东,邬斌,等. 中国铌钽锆铪资源[J]. 科学通报, 2020,65(33):3763-3777.
WANG Rucheng, CHE Xudong, WU Bin, et al. Critical mineral resources of Nb, Ta, Zr, and Hf in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2020,65(33):3763-3777.

[8] 任国兴,肖松文,李家林,等. 复杂铌矿高温还原熔炼-炉渣冷却结晶富集铌试验[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):79-83.
REN Guoxing, XIAO Songwen, LI Jialin, et al. Selective enrichment of niobium in complex ore by reduction smelting and cooling crystallization of slag[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(4):79-83.

[9] 陈昌,韩文生,冉孟杰,等. 白云鄂博矿铌物相转化与成核生长研究[J]. 有色金属工程, 2024,14(8):111-120.
CHEN Chang, HAN Wensheng, RAN Mengjie, et al. Study on phase transformation and nucleation growth of Bayan Obo niobium ore[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024,14(8):111-120.

[10] HAN W S, RAN M J, LU X, et al. The effects of multielement basicity on niobium-bearing phase reconstruction in low grade niobium rougher concentrate[J]. Minerals Engineering, 2024,217:108951.

[11] 陈雯,卢翔,许海峰,等. 多种典型铌矿相纯矿物固相转化为单一烧绿石的方法:CN118791303B[P]. 2024-11-15.
CHEN Wen, LU Xiang, XU Haifeng, et al. Method for solid-phase transformation of pure minerals with various niobium phases into single pyrochlore: CN118791303B[P]. 2024-11-15.

引用本文:卢翔,韩文生,冉孟杰,等. 铌钙矿转化为烧绿石的晶粒生长动力学[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):129-132.
LU Xiang, HAN Wensheng, RAN Mengjie, et al. Grain growth kinetics of pyrochlore derived from fersmite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):129-132.